МАШИНОСТРОЕНИЕ И МАШИНОВЕДЕНИЕ
MACHINE BUILDING AND MACHINE SCIENCE



УДК 621.791.75:004.942 https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-259-268

Физико-математическое моделирование особенностей формирования угловых швов мостовых металлоконструкций при дуговой сварке под флюсом



А. А. Мосин[1], В. А. Ерофеев[2], М. А. Шолохов[3]
[1]ЗАО «Курганстальмост» (г. Курган, Российская Федерация)
[2] ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (г. Тула, Российская Федерация)
[3]ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина» (г. Екатеринбург, Российская Федерация)

Введение. Исследовано формирование швов мостовых металлоконструкций при дуговой сварке под флюсом. Цель работы — изучить возможности увеличения производительности процесса дуговой сварки угловых швов.
Материалы и методы. Для оптимизации технологии задействованы методы компьютерного анализа. С их помощью разработана физико-математическая модель формообразования угловых швов при сварке под флюсом. Она основана на системе уравнений теплопроводности и равновесия поверхности сварочной ванны. В данной системе формирование дуговой каверны определено по изотерме кипения флюса под действием излучения столба дуги, учтены теплоперенос парами флюса внутри дуговой каверны и влияние пространственного положения на формирование сварочной ванны.
Результаты исследования. Предложены новые математические зависимости, описывающие физические явления при дуговой сварке угловых швов под флюсом. Основная особенность предложенной модели — учет принципиального отличия дуговой сварки под флюсом от дуговой сварки в защитном газе, а именно: при сварке под флюсом дуга горит в парогазовой полости, возникающей при плавлении и испарении флюса. Проведено численное моделирование распределения температур при сварке под флюсом «в лодочку» и «в угол». Выявлены ограничения процесса при сварке угловых швов за один проход. Установлено, что сварка под флюсом «в лодочку» в один проход обеспечивает качественное формирование швов практически для любой толщины листов металла. При сварке «в угол» качественное формирование обеспечивается только для толщины до 8 мм. При больших толщинах формирование шва нарушается из-за стекания расплава с вертикальной стенки. В этом случае катет углового шва уменьшится, образуется характерный подрез, поэтому сварной шов будет асимметричным и менее прочным.
Обсуждение и заключение. Сравнение результатов численного анализа с фактическими данными о режимах сварки при производстве мостовых металлоконструкций показало, что существующие технологии сварки угловых швов уже достигли своей максимальной производительности. Далее повышать производительность за счет формирования катетов увеличенного размера можно только при многодуговых или многоэлектродных способах сварки.

Ключевые слова: угловой шов, сварка под флюсом, физико-математическая модель, численное моделирование, дуговая каверна.

Для цитирования: Мосин, А. А. Физико-математическое моделирование особенностей формирования угловых швов мостовых металлоконструкций при дуговой сварке под флюсом / А. А. Мосин, В. А. Ерофеев, М. А. Шолохов // Advanced Engineering Research. — 2020. — Т. 20, № 3. — С. 259−268. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-259-268



Physicomathematical modeling of the formation features of fillet welds of bridge metal structures under submerged-arc welding

A. A. Mosin[1], V. A. Erofeev[2], M. A. Sholokhov[3]
[1] "Kurganstalmost" CJSC (Kurgan, Russian Federation)
[2] Tula State University (Tula, Russian Federation)
[3] Ural Federal University named after the First President of Russia B.N. Yeltsin (Ekaterinburg, Russian Federation)

Introduction. The weld formation under the submerged-arc welding of bridge metal structures is investigated. The work objective is to study possibilities to increase the welding performance during the arc welding of fillet seams.
Materials and Methods. Methods of computer analysis are used to optimize the technology. With their help, a physicomathematical model of fillet weld formation under the submerged-arc welding has been developed. It is based on a system of equations for thermal conductivity and equilibrium of the weld pool surface. In this system, the formation of an arc cavern is determined through the flux boiling isotherm under the action of the arc column radiation; heat transfer by the flux vapor inside the arc cavern and the influence of the spatial position on the formation of the weld pool are taken into account.
Results. New mathematical relationships that describe physical phenomena under the submerged-arc welding of fillet welds are proposed. The key feature of the proposed model is in the fundamental difference between the submerged-arc welding and the gas-shielded arc welding, i.e., during submerged-arc welding, the arc burns in a gas-vapor cavern that appears due to the melting and evaporation of flux. Numerical simulation of the temperature distribution during production of the fillet welds in 1F and 2F positions is carried out. The process constraints under the single-run welding of the fillet welds are specified. It was determined that the single-run submerged-arc welding of fillet welds in 1F position exhibits high-quality formation of welds for almost the entire range of metal sheet thicknesses. During production of fillet welds in 2F position, high-quality formation is provided only for sheet thicknesses up to 8 mm. At heavy thicknesses, the formation of the seam is disrupted due to the melt flow from the vertical wall. In this case, the leg length decreases; a typical undercut is formed; so the weld will be asymmetric and less strong.
Discussion and Conclusions. Comparison of the numerical analysis results with actual data on welding modes under the production of bridge metal structures shows that the existing fillet welding technologies have already reached their maximum efficiency rate. Further productivity gain is possible by forming oversized legs only with multiarc or multielectrode welding methods.

Keywords: fillet weld, submerged-arc welding, physicomathematical model, numerical simulation, arc cavern.

For citation: A.A. Mosin, V.A. Erofeev, M.A. Sholokhov. Physicomathematical modeling of the formation features of fillet welds of bridge metal structures under submerged arc welding. Advanced Engineering Research, 2020, vol. 20, no. 3, p. 259−268. https://doi.org/10.23947/2687-1653-2020-20-3-259-268

Введение. Традиционные методы строительства мостов предусматривают укрупненную сборку объемных сварных металлоконструкций на месте строительства [1]. Поэтому на самом объекте сварочные работы проводятся по минимуму. Они выполняются, в основном, на заводах мостовых металлических конструкций [2], и бóльшая их часть связана со сваркой протяженных швов. Из них на угловые приходится от 40 % до 70 %. Угловые швы при малой толщине свариваются без разделки кромок. При толщинах до 50 мм применяются асимметричная и симметричная разделки с углом раскрытия 45–60°. Оптимальны угловые швы с плоской поверхностью в поперечном сечении и плавными переходами к основному металлу по зонам сплавления без наплывов и подрезов, газовых полостей и шлаковых включений. Помимо этого сварные соединения должны обладать высокой пластичностью и ударной вязкостью при низких температурах. Недопустимы дефекты формирования швов. Бездефектное воспроизведение максимально возможного катета при сварке угловых швов является основным резервом повышения производительности [3].

Для минимизации дефектов и повышения производительности процессов сварки мостовых металлоконструкций угловые швы с максимально возможным размером катета желательно сваривать в один проход. Поэтому актуальной задачей является увеличение катета, свариваемого за один проход [4]. Этого можно достичь:

— оптимизацией параметров процессов сварки,
— использованием новых источников нагрева,
— сокращением вспомогательного времени,
— повышением легкоплавкости электродной проволоки.

В первую очередь следует рассмотреть возможность бездефектного воспроизведения в заводских условиях максимально возможного катета при использовании традиционной технологии сварки под флюсом

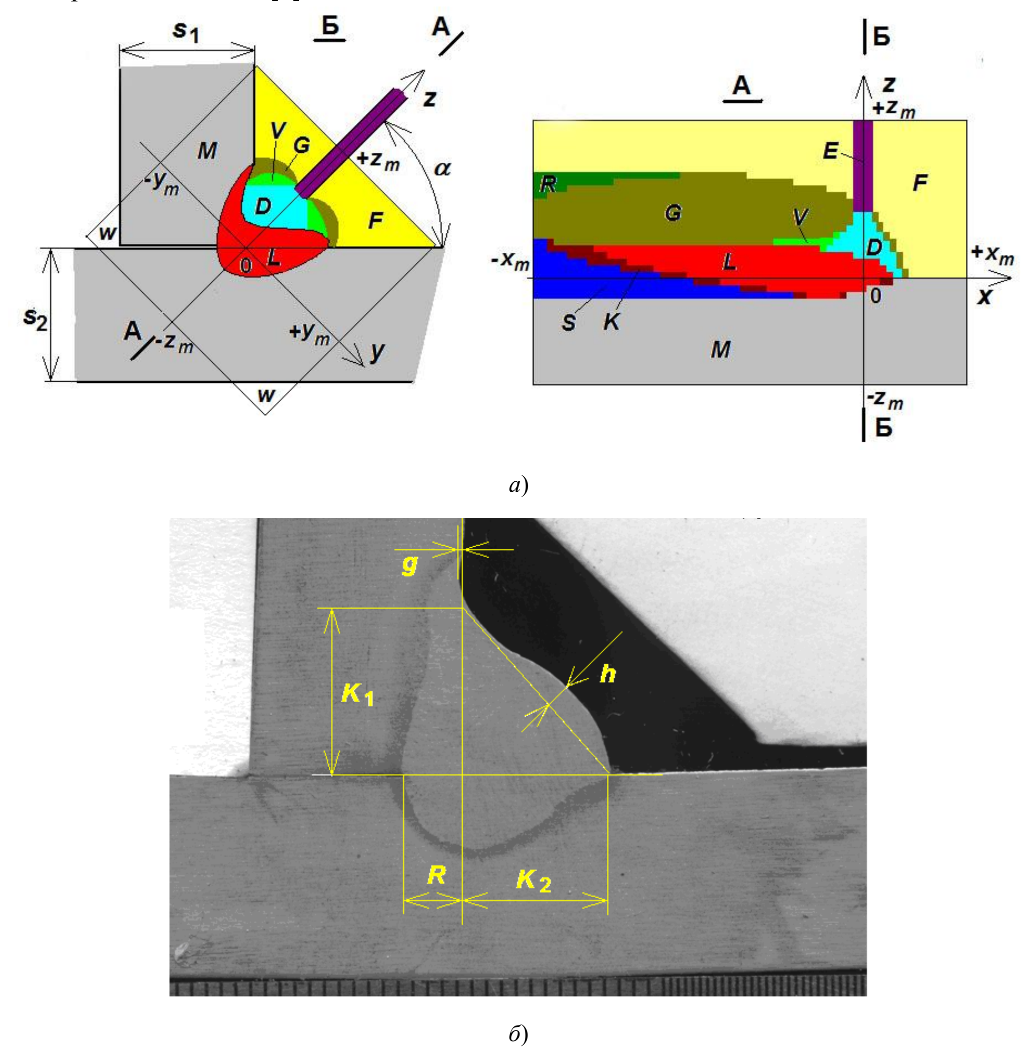
плавящимся электродом.

Цель настоящей работы — изучение возможностей увеличения производительности процесса дуговой сварки угловых швов с учетом особенностей их формирования.

Материалы и методы. Как отмечается в [5], помимо общеизвестных параметров режима сварки (ток дуги, скорость сварки) на производительность процесса сварки под флюсом влияют напряжение дуги и диаметр электродной проволоки. Пространственное положение при сварке и позиционирование электрода в разделке также существенно влияют на формирование угловых швов [6]. Рассмотреть влияние всей совокупности перечисленных факторов на производительность процесса сварки и качество угловых швов без использования современных методов исследования — крайне трудоемкая задача.

Для существенного сокращения объема экспериментальных исследований сварки угловых швов применяют физико-математическое моделирование напряжений и особенностей формообразования и провара [7–9]. Рассмотрим последовательность компьютерного моделирования особенностей формирования угловых швов — от создания модели до ее визуализации. Основное отличие способа дуговой сварки под флюсом от дуговой сварки в защитном газе состоит в том, что дуга горит в парогазовой полости, возникающей из-за плавления и испарения флюса. Вторая важная особенность: физические явления, определяющие формирование сварочной ванны и шва, протекают в разных средах [9]. Это следует учесть в физико-математической модели формирования шва при сварке под флюсом.

Координаты пространства моделирования. При моделировании обозначают пространство, в котором происходит сварка угловых швов, и геометрические размеры качественных швов. На рис. 1 *а* выделена область пространства, охватывающая свариваемые кромки и зоны горения дуги, плавления флюса и металла, а на рис. 1 *б* — геометрические размеры угловых швов, по которым можно оценить качество их формирования в соответствии с рекомендациями [5].



а)

б)

Рис. 1. Строение пространства моделирования процесса сварки (*а*) и геометрические размеры угловых швов (*б*), определяющие качество их формирования

Пространство моделирования включает зоны: M — исходный металл, E — электрод, D — сварочная дуга, F — сыпучий флюс, V — пар флюса, G — расплавленный флюс, R — затвердевший флюс, L — жидкий металл, K — твердожидкий металл, S — металл шва, W — воздух. Внутренние межзонные поверхности обозначены как пересечения множеств точек, принадлежащих соответствующим зонам. Например, поверхность сварочной ванны $Z_L(x, y)$ обозначена $L\cap(D\cup V\cup G)$. Она отделяет сварочную ванну L от сварочной дуги D, парообразного V и жидкого G флюса. Размеры зон V, G, L, K и расположение поверхностей раздела между ними неизвестны. Их необходимо определить при моделировании. Эти показатели зависят от результатов решения системы уравнений, описывающих физические явления сварки под флюсом. Такую задачу удобнее решать в неподвижной Декартовой системе координат, в которой металл свариваемого стыка неподвижен, а электрод и дуга перемещаются со скоростью сварки v_{w} по направлению координаты x. Соответственно, координаты оси электрода x_f и y_f определяются:

$$H_{i,j,k}(t)=H_{i+1,j,k}(t-\tau), \tag{1}$$

где t — время с момента возбуждения.

При сварке поверхности углового шва и раздела зон ориентированы преимущественно в плоскости, соединяющей катеты углового шва. Такие поверхности удобно описывать как отклонение от этой плоскости. Поэтому координата z направлена по биссектрисе α угла между листами (или угла разделки кромок).

Теплоперенос является общим процессом для всех выделенных зон. При моделировании рассматривается термодинамическое состояние сред с разными теплофизическими свойствами, в которых действуют несколько внутренних объемно распределенных источников теплоты. Скорость изменения и распределение энтальпии следует описывать уравнением [10]:

$$\frac{\partial H}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+q\,(x, y, z, t). \tag{2}$$

Здесь $H = H(x, y, z, t)$ — объемная энтальпия, Дж/см^3; $\lambda = \lambda(T)$ — коэффициент теплопроводности, зависящий от температуры и материала среды, Вт/(см·°С); q — объемный источник теплоты. Температура $T(x, y, z, t)$ связана с энтальпией $H(x, y, z, t)$ нелинейной функцией $T(H)$, учитывающей зависимость теплоемкости от температуры и теплоты фазовых и агрегатных превращений. В начальный момент времени сварочная ванна отсутствует, флюс находится в сыпучем состоянии, температура во всех точках пространства одинакова и равна температуре окружающей среды. С учетом этого теплообмен зоны моделирования с внешним пространством можно описать граничными условиями:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}=0,\ x=\pm x_m, \tag{3}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}=0,\ y=\pm y_m, \tag{4}$$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}=0,\ z=\pm z_m. \tag{5}$$

Источники теплоты. Основные источники теплоты: электрическая дуга q_{arc}, действующая в зоне D, и теплота, выделяемая при вылете электрода [11, 12]. Тепловыделение в жидком флюсе практически отсутствует, так как он не имеет прямого контакта с электродом, температура которого меньше температуры плавления флюса, а электрическое сопротивление порошкового флюса очень велико. С учетом этих обстоятельств скорость нагревания металла в вылете электрода (в зоне E) можно описать соотношением:

$$\frac{\mathrm{d}T_f}{\mathrm{dz}}=\frac{\rho_e j^2}{c\rho_f}\frac{z_m-z}{v_f}, \tag{6}$$

где T_f — температура вылета; $\rho_e=\rho_e(T_f)$ — удельное электрическое сопротивление; $j=\frac{4I}{\pi d_f^2}$ — плотность тока I в электроде диаметром d_f; $c\rho_f$ — объемная теплоемкость материала электрода; v_f — скорость подачи электродной проволоки.

Тепловыделение в анодной области дуги на поверхности $E\cap D$ описано как тепловой поток:

$$\frac{dq}{dz}=jU_a, \tag{7}$$

где U_a — падение напряжения в анодной области дуги.

Тепловыделение в плазменном факеле дуги учтено как распределение излучения столба дуги по поверхности дуговой каверны $L\cap(D\cup V)$:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}=0,\ y=\pm y_{n'}. \tag{8}$$

Тепловой поток, создаваемый тепловыделением в катодной области дуги на поверхности $L\cap D$, равен:

$$\frac{dq}{dn}=\frac{IU_k}{\pi R^2}\exp\left(\frac{-r_0^2}{R^2}\right), \tag{9}$$

где U_k — катодное напряжение дуги, R — эффективный радиус дуги, r_0 — расстояние между точкой поверхности $L\cap D$ и точкой пересечения оси дуги с этой поверхностью.

Теплоперенос каплями электродного металла учитывается тепловым потоком через поверхность $L\cap D$ [13]:

$$\frac{dq}{dn} = \frac{IT_k}{\pi R^2}\exp\left(\frac{-r_0^2}{R^2}\right), \quad (10)$$

где T_k — температура капель, принятая равной полусумме температур плавления и кипения материала электрода.

Теплопередача парами флюса описана как тепловой поток через поверхность сварочной ванны $L\cap V$ и флюса $G\cap V$: $\frac{\partial^2 T}{\partial z^2} = 0, z = \pm z_m$. Коэффициент теплопередачи определяется из баланса мощностей испарения и конденсации пара:

$$\int_{S_Z}\frac{dq}{dn}dS_Z\,\overrightarrow{p\,\mathrm{vap} = \mathrm{var}}0, \quad (11)$$

где S_z — площадь указанных поверхностей $L\cap V\cup G\cap V$.

Уравнение равновесия поверхности сварочной ванны. Расположение поверхности сварочной ванны $Z(x, y)$, разграничивающей зоны $L\cap(D\cup V\cup G)$, определено решением уравнения равновесия давлений на ней:

— капиллярного p_σ,
— гравитационного p_g,
— потока капель электродного металла p_f,
— гидродинамического давления потока металла сварочной ванны p_v,
— электродинамического давления дуги p_a,
— внутреннего давления жидкого металла p_m.

$$\frac{dT_f}{dz} = \frac{\rho_e j^2}{c\rho_f}\frac{z_m - z}{v_f}. \quad (12)$$

Капиллярное давление определяется кривизной поверхности $Z(x, y)$ и при малых прогибах вычисляется:

$$p_\sigma = -\sigma\left(\frac{\partial^2 Z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 Z}{\partial y^2}\right), \quad (13)$$

где σ — коэффициент поверхностного натяжения.

Гравитационное давление определяется весом столба вещества над точкой поверхности сварочной ванны:

$$p_g = \mathrm{g}(\rho(Z - z_{\max}) + \rho_h Z_h), \quad (14)$$

где g — ускорение свободного падения; ρ, ρ_h — плотности металла и шлака; z_{max} — максимальная высота поверхности сварочной ванны; Z_h — толщина слоя жидкого шлака.

Электродинамическое давление сварочной дуги определяется током дуги:

$$p_a = \frac{k_a I^2}{\pi R_p^2}\exp\left[-\frac{(x_0 + v_w t)^2 + y^2}{R_p^2}\right], \quad (15)$$

где k_a — электродинамический коэффициент, R_p — силовой радиус дуги.

Давление потока капель электродного металла определяется скоростью и массой потока:

$$p_f = \rho\frac{v_f^2}{2}\exp\left[\frac{-(x_0 + v_w t)^2 + y^2}{R_f^2}\right]. \quad (16)$$

Гидродинамическое давление потока металла сварочной ванны определяется темпом изменения площади сечения сварочной ванны S_L:

$$p_v = -\rho v_x^2\frac{dS_L}{dx}. \quad (17)$$

Эта составляющая увеличивает давление перед дугой и уменьшает позади дуги.

Внутреннее давление в расплаве p_m определяется из равенства площади наплавленного металла количеству израсходованного металла электрода:

$$S_{S\cup M}(-x_m) - S_M(+x_m)\overrightarrow{p_m = var}\pi\, r_f\frac{v_f}{v_w}, \quad (18)$$

где $S_{S\cup M}(-x_m)$ — площадь поперечного сечения металла в конце области моделирования при $x = -x_m$; $S_M(x)$ — начальная площадь поперечного сечения разделки кромок при $x = x_m$.

Ток и расположение сварочной дуги. Ток сварочной дуги I задается скоростью подачи v_f и диаметром d_f электрода:

$$I = v_f\frac{\pi d_f^2}{4}\left(c\rho_f\left(T_k - T_f\right) + H_{LS}\right), \quad (19)$$

где T_k — температура капель электродного металла; H_{LS} — объемная удельная теплота плавления.

Длина l сварочной дуги задается напряжением U_0 источника питания и зависит от электрического сопротивления токоведущих элементов R_0 и вылета электрода R_f:

$$l = 1/E\,(U_0 - U_a - U_k - I\,(R_0 + R_f)). \quad (20)$$

Длина дуги определяется градиентом потенциала E в столбе дуги, значение которого зависит от свойств пара флюса. При криволинейной поверхности $L\cap D$ катодного пятна понятие длины дуги нуждается в уточнении. Если рассматривать столб дуги как множество параллельных проводников, то плотность тока будет тем больше, чем меньше расстояние от конца электрода до точки поверхности металла. Среднюю длину l множества таких проводников можно определить решением уравнения:

$$\sqrt{\frac{1}{S}\int_0^S\frac{1}{r^2}dS} = \frac{1}{l}. \quad (21)$$

Здесь r — расстояние от конца электрода до рассматриваемой точки поверхности сварочной ванны; S — площадь сечения столба, определяемая эффективным радиусом R дуги. Последний зависит от тока I дуги [13]:

$$R=\sqrt{\frac{I}{\pi j}+R_f^2},$$

где j — плотность тока в дуге в парах флюса.

Электрическое сопротивление вылета зависит от его длины L_f и температуры T_f, распределенной по длине:

$$R_f=\frac{4}{\pi d_f^2}\int_0^{L_f}\rho_e\big(T_f(z)\,dz\big). \quad (22)$$

Алгоритм численного решения системы уравнений физико-математической модели. Изначально неизвестно геометрическое строение зоны формирования сварочной ванны. Это требует непрерывной корректировки расположения межзонных поверхностей в зависимости от результатов решения уравнений теплопроводности и равновесия сварочной ванны. Расположение поверхностей, разграничивающих твердое, жидкое и газообразное состояние флюса и металла, уточняется по положению соответствующих изотерм в результате решения уравнения теплопроводности. Для корректировки расположения поверхности сварочной ванны решается уравнение равновесия давлений на данной поверхности $Z(x, y)$. В этом случае необходимо изменить размеры зон L, V, G, D. Принимается, что температуры металла и шлака в зоне перемещения равны температуре поверхности на момент выполнения решения, а их энтальпии изменяются в соответствии с этой температурой. При трансформации возникают погрешности, которые определяются как скорости изменения энтальпии при изменении объемов v_L, v_G зон L и G:

$$\Lambda_L=\frac{d}{dt}\left(\int_{v_L}Hdv_L\right) \text{ и } \Lambda_G=\frac{d}{dt}\left(\int_{v_G}Hdv_G\right). \quad (23)$$

Эти погрешности компенсируются изменением энтальпии зон L и G в зависимости от распределения в них температуры:

$$\frac{d}{dt}H\big((x,y,z)\in L\big)=\Lambda_L\frac{T(x,y,z)-T_L}{\frac{1}{v_L}\int_{v_L}(T(x,y,z)-T_L)\,dv_L}, \quad (24)$$

где T_L — температура ликвидуса.

По мере приближения термодинамического состояния к установившемуся состоянию погрешность трансформации $\Lambda_L \to 0$. Условием окончания моделирования является стабилизация длины изотермы солидуса:

$$\frac{d}{dt}(\max x\in S)\to 0. \quad (25)$$

Система уравнений модели решается распределением температуры $T(x, y, z, t)$ и геометрического строения зоны моделирования. Это позволяет воспроизвести начальную стадию процесса с момента возбуждения дуги до достижения установившихся размеров сварочной ванны. Для решения уравнений теплопроводности и равновесия поверхности сварочной ванны использован метод конечных разностей на сопряженных сетках. На межфазных поверхностях коэффициент теплопроводности определяли как среднегармоническое значение теплопроводности соседних фаз.

Ниже схематично представлен алгоритм численного моделирования процесса сварки.

- Исходные данные: геометрия разделки кромок после выполнения предшествующего прохода, теплофизические свойства стали и флюса, параметры сварки
- Определение начальной геометрии области численного решения
Расчет параметров плавления электродной проволоки и энергетических характеристик сварочной дуги
- Цикл нестационарного численного моделирования термодинамического состояния области формирования сварочной ванны
  - Определение распределения тепловых потоков по поверхностям металла и шлака
Решение уравнения теплопроводности
  - Решение вариационной задачи о расположении сварочной дуги в разделке кромок
    - Решение уравнения равновесия поверхности сварочной ванны при воздействии капиллярного, гравитационного, электродинамического, гидродинамического и внутреннего давлений
    - Расчет внутреннего давления сварочной ванны по условию баланса масс шва и подачи электрода

    до равенства масс наплавки и подачи электрода
  - Корректировка расположения межфазовых границ «пар — шлак — сыпучий флюс — твердый шлак», «твердый — жидкий металл» по решениям уравнения теплопроводности и равновесия поверхности сварочной ванны

  до стабилизации длины изотермы температуры солидуса
- Формирование протокола результатов моделирования по распределению температур, геометрии области формирования сварочной ванны, энергетических характеристик процесса сварки

Рис. 2. Алгоритм численного моделирования формирования шва при дуговой сварке под флюсом

Результаты исследования. Для виртуального исследования взяли сведения о теплофизических свойствах сталей из [13]. Кроме того, использовали данные группы компаний «Трансстрой» о конкретных применяемых марках сталей и технологических материалах, режимах сварки под флюсом угловых швов мостовых металлоконструкций[1].

Виртуальное воспроизведение процесса сварки «в лодочку». Для проверки разработанной модели выполнили компьютерное моделирование процесса сварки таврового соединения Т1 листов из стали 15ХСНД толщиной 12 мм. Режим сварки выбрали в соответствии с рекомендациями [14]: проволока Св08ГА диаметром 5 мм, напряжение дуги — 34 В, скорость сварки — 18 м/час (5 мм/с), вылет электрода — 25 мм. Скорость подачи электрода, рассчитанная в модели, — 10 мм/с, что соответствует данным работы [14], рекомендующей эти значения в диапазоне 55–61 м/час.

На рис. 3 представлены результаты моделирования процесса сварки при наклоне листов 45° (в «лодочку»).

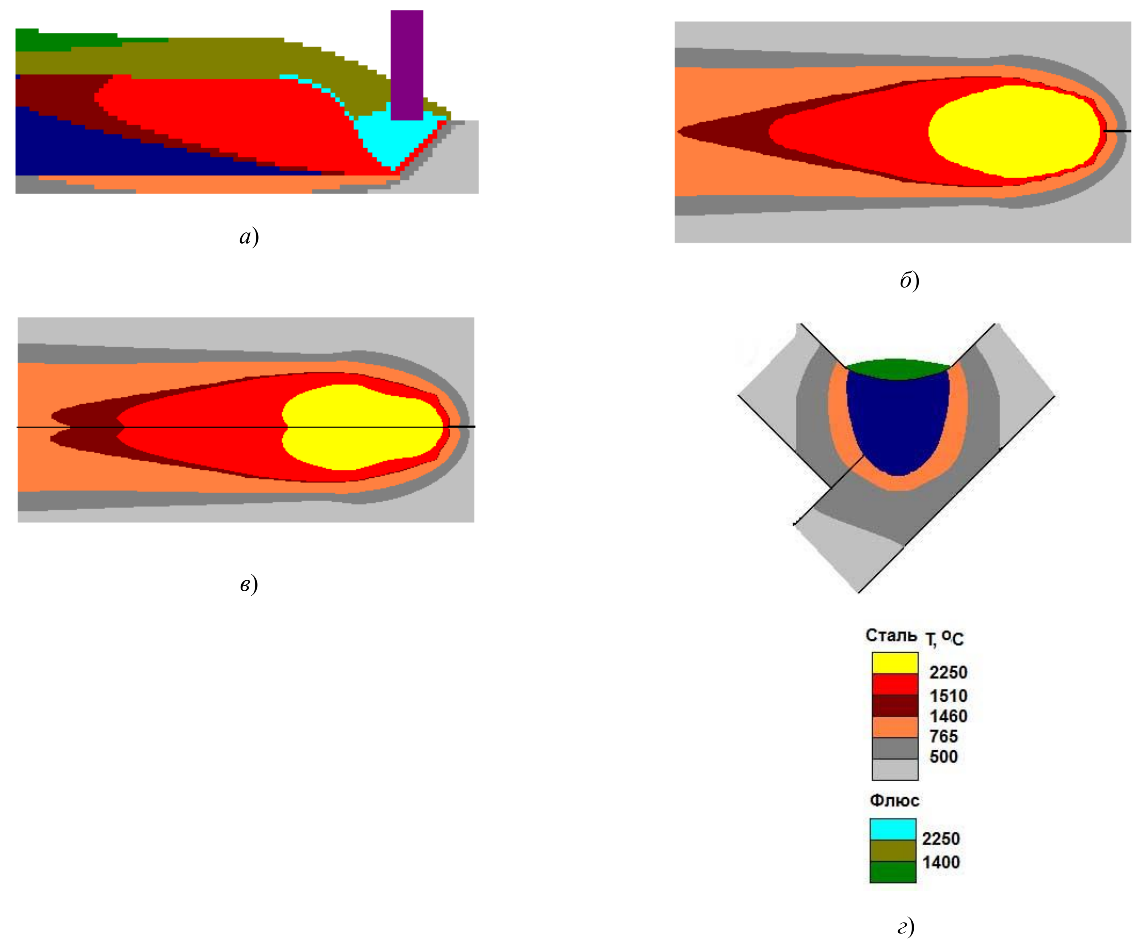


Рис. 3. Распределение температуры при моделировании процесса сварки углового шва под флюсом при наклоне листов 45° (в «лодочку»): *а* — продольное сечение сварочной ванны в плоскости симметрии стыка ; *б* — поверхность металла под флюсом; *в* — поверхность свариваемых листов; *г* — расчетный профиль поперечного сечения шва

В результате получены значения: длина дуги — 6,8 мм; эффективное падение анодного напряжения — 5,9 В, катодного — 8,5 В; градиент потенциала в столбе дуги — 4,4 В/мм; диаметр столба дуги — 18 мм. Общая мощность процесса — 23 кВт, из нее на излучение приходится 12,9 кВт. Дуга выделяет на электроде 4,3 кВт; на поверхности стыка — 5,8 кВт. Мощность тепловыделения в вылете электрода — 0,2 кВт; температура его нагрева током дуги — 152 °С. Площадь плана дуговой каверны — 135 мм^2; объем каверны — 519 мм^3. Глубина кратера под дугой — 16 мм. Длина сварочной ванны на поверхности по ликвидусу — 38 мм, по солидусу — 52 мм. Масса сварочной ванны — 150 г. Ширина шва — 15 мм; катет — 10,7 мм; глубина проплавления стыка — 6 мм; площадь поперечного сечения — 158 мм^2. Шов формируется с мениском до 1,3 мм.

Виртуальное воспроизведение процесса сварки «в угол». При сварке конструкций большого размера невозможно использовать кантователи. В этом случае выполняется сварка «в угол». Результат моделирования формирования шва при таком положении и тех же условиях показан на рис. 4.

[1] СТО-ГК «Трансстрой»-012-2007. Стальные конструкции мостов. Заводское изготовление / Трансстрой. М., 2007. 174 с.

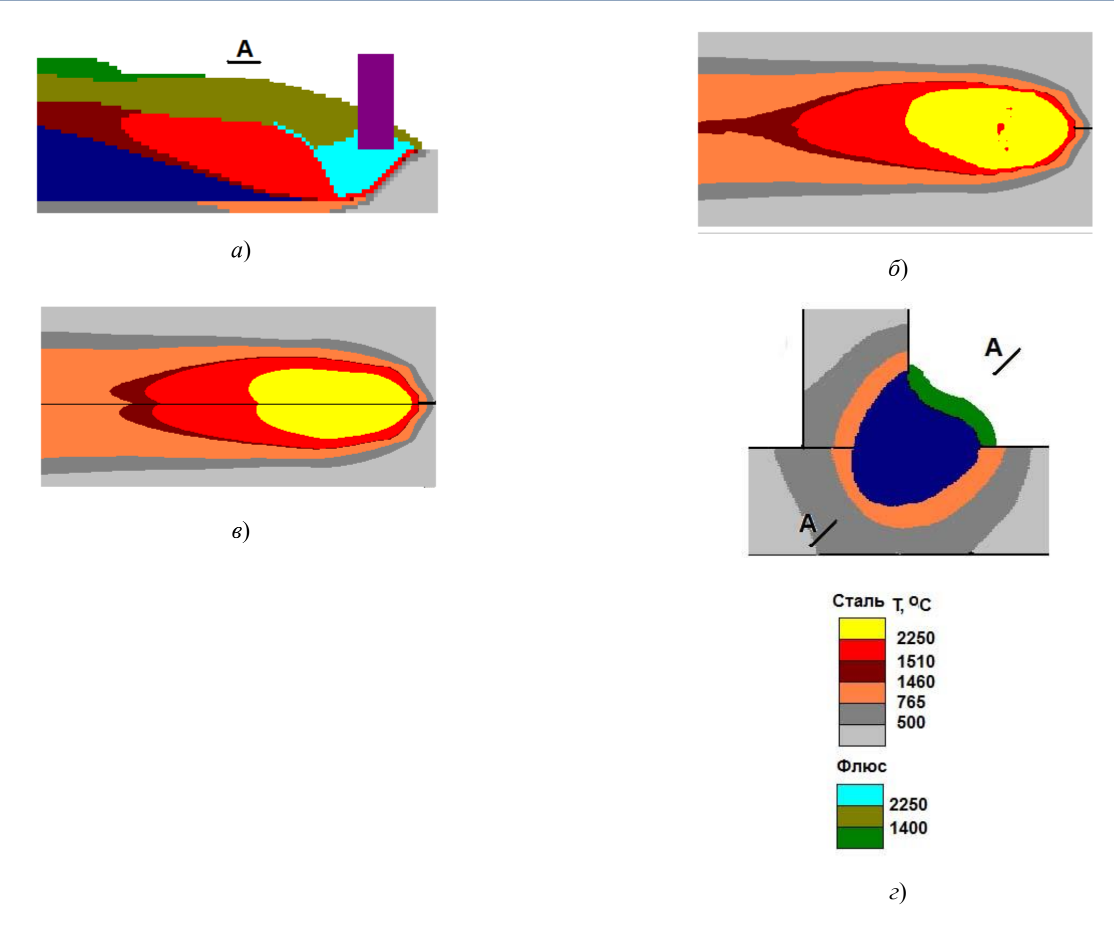


Рис. 4. Результат компьютерного моделирования формирования углового шва при сварке «в угол» с приваркой вертикальной стенки к горизонтальному основанию: *а* — продольное сечение сварочной ванны в плоскости симметрии стыка; *б* — поверхность металла под флюсом; *в* — поверхность свариваемых листов; *г* — расчетный профиль поперечного сечения шва

Заметное стекание расплава со стенки стыка на полку при сварке «в угол» обусловлено большой массой сварочной ванны. Отклонение поверхности шва от плоскости, соединяющей стенки, — ±1,5 мм. Расплав стекает с вертикальной стенки на горизонтальное основание, поэтому сварной шов получается асимметричным, а расплав в верхней части шва уменьшается на 2 мм.

Максимально возможный размер катета. Необходимо выяснить, при каком максимальном размере катета (сварка «в лодочку» и «в угол») формируется качественный шов. С этой целью выполнили моделирование сварки углового шва листов толщиной 8 мм проволокой диаметром 2 мм при токе дуги 350 А. Варьировали скорость сварки и напряжение дуги. Результаты представлены на рис. 5.

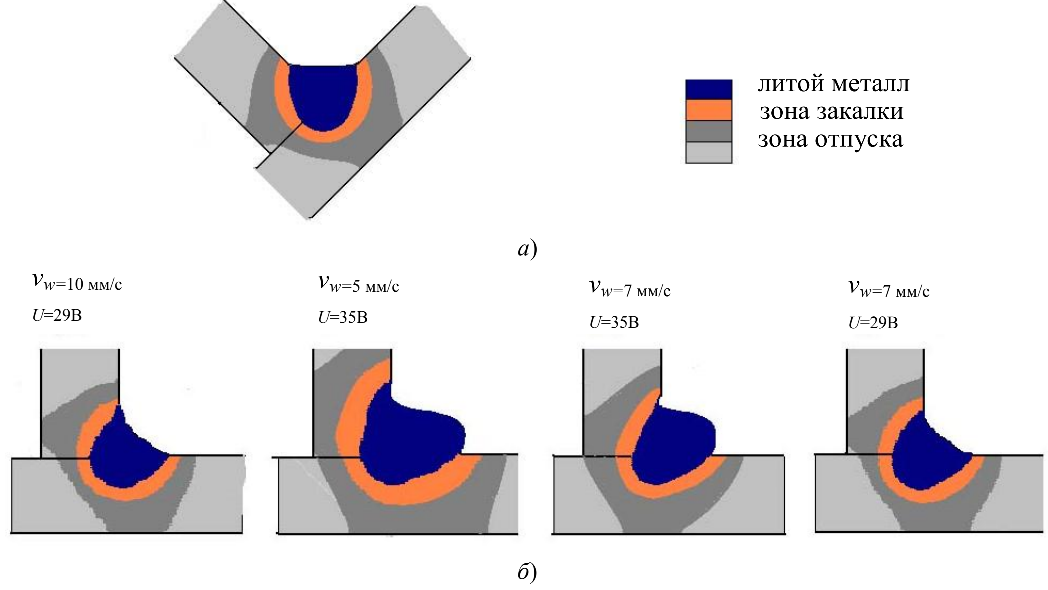


Рис. 5. Результат компьютерного моделирования формирования шва: *а* — «в лодочку», *б* — «в угол»

Если соблюдать рекомендуемую в работе скорость сварки «в лодочку» (рис. 5 *а*), формируется шов с равными катетами 6 мм. Это меньше требуемого, но без наплыва и мениска. При сварке «в угол» на том же режиме (рис. 5 *б*) формируется шов с мениском. Для увеличения катета выполнили моделирование при меньшей скорости сварки и большем значении напряжения дуги. При скорости 5 мм/с и напряжении 35 В площадь сечения литой зоны и ее размеры существенно увеличиваются, но формируется шов с подрезом и натеком. Увеличение скорости сварки до 7 мм/с уменьшает натек. Если снизить напряжение, приемлемый шов формируется при катетах около 7 мм.

Эти результаты показывают, что рекомендуемые режимы сварки под флюсом являются наиболее производительными для получения катетов заданных размеров. Для получения катетов большего размера при однодуговой сварке необходимы дополнительные проходы. Однако общая производительность сварки в этом случае значительно снижается.

Обсуждение и заключение. Трудоемкость изготовления элементов мостовых конструкций в значительной мере определяется трудоемкостью сварки. Рациональным способом повышения производительности является использование автоматической сварки под флюсом. Для оптимизации технологии методами компьютерного анализа разработана физико-математическая модель формообразования угловых швов при сварке под флюсом. Основа модели — система уравнений теплопроводности и равновесия поверхности сварочной ванны. В данной системе формирование дуговой каверны определено по изотерме кипения флюса под действием излучения столба дуги. Учтены теплоперенос парами флюса внутри дуговой каверны и влияние пространственного положения на формирование сварочной ванны. Численно решены уравнения модели сварки под флюсом углового соединения при толщине металла, типичной для мостовых конструкций. Решение показало, что при выполнении сварки «в лодочку» соединение формируется в один проход. По данным моделирования, при сварке углового шва «в угол» возможно неудовлетворительное формирование из-за стекания жидкого металла с вертикальной стенки. В этом случае для получения качественного шва необходимы дополнительные подварочные проходы.

Исследования показали, что традиционная технология однодуговой сварки под флюсом угловых швов с формированием катетов увеличенного размера уже достигла своей максимальной производительности. Для дальнейшего ее повышения необходимо использовать более сложные специальные приемы. Среди таких нетрадиционных технологий:

— многодуговые и многоэлектродные способы сварки [14, 15],

— введение в сварочную ванну нетоковедущей (холодной) присадочной проволоки [16], гранулированной металлической присадки (крупки) или металлического порошка [17].

Библиографический список

1. Курлянд, В. Г. Строительство мостов : учеб. пособ. для вузов / В. Г. Курлянд, В. В. Курлянд. — Москва : МАДИ, 2012. — 176 с.

2. Полосков, С. С. Организационно-управленческий механизм управления инновационным потенциалом высокотехнологичных наукоемких предприятий / С. С. Полосков, А. В. Желтенков // Экономика и предпринимательство. — 2019. — № 2 (103). — С. 1051–1057.

3. Вотинова, Е. Б. Основы технологической подготовки производства / Е. Б. Вотинова, М. П. Шалимов, А. М. Фивейский. — Екатеринбург : УрФУ, 2017. — 168 с.

4. Мосин, А. А. Возможности повышения производительности сварки протяженных угловых швов мостовых металлоконструкций / А. А. Мосин // Сварка и диагностика. — 2020. — № 1. — С. 50–54.

5. Исследование влияния режимов сварки под слоем флюса на форму и проплавление угловых швов / А. О. Артемов, В. В. Каратыш, В. М. Язовских [и др.] // Вестник ПГТУ. Машиностроение, материаловедение. — 2010. — Т. 12, № 5. — С. 130–142.

6. Томас, К. И. Технология сварочного производства / К. И. Томас, Д. П. Ильященко. — Томск : Изд-во ТПУ. — 2011. — 247 с.

7. Shen, J. Welding simulation of fillet-welded joint using shell elements with section integration / J. Shen, Z. Chen // Journal of Materials Processing Technology. — 2014. — Vol. 214, no. 11. — P. 2529–2536.

8. Cho D.-W. Analysis of submerged arc welding process by three-dimensional computational fluid dynamics simulations / D.-W. Cho, W.-H. Song, M.-H. Cho [et al.] // Journal of Materials Processing Technology. — 2013. — Vol. 213, no. 12. — P. 2278–2291.

9. Математическая модель процесса сварки под флюсом и явлений в дуговой каверне / В. А. Судник, В. А. Ерофеев, А. В. Масленников [и др.] // Сварочное производство. — 2012. — № 7. — С. 3–12.

10. Судник, В. А. Математическая модель формирования сварочной ванны при дуговой сварке под флюсом и анализ процесса переноса металла / В. А. Судник, В. А. Ерофеев, А. В. Масленников // Известия

Тульского государственного университета. — 2015. — Вып. 6, ч. 2. — С. 21–31.

11. Ghosh, A. Mathematical modeling of moving heat source shape for submerged arc welding process / A. Ghosh, H. Chattopadhyay // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. — 2013. — Vol. 69. — P. 2691–2701.

12. Лесков, Г. И. Электрическая сварочная дуга / Г. И. Лесков. — Москва : Машиностроение, 1970. — 355 с.

13. Тайц, Н. Ю. Технология нагрева стали / Н. Ю. Тайц. — Москва : Металлургиздат, 1962. — 568 с.

14. Инженерная методика расчета параметров режима двухдуговой сварки угловых швов / А. Ю. Мельников, А. М. Фивейский, М. А. Шолохов, А. Е. Филяков // Сварка и диагностика. — 2016. — № 3. — С. 46–48.

15. Kiran, D. V. Arc interaction and molten pool behavior in the three wire submerged arc welding process / D. V. Kiran, D.-W. Cho, W.-H. Song [et al.] // International Journal of Heat and Mass Transfer. — 2015. — Vol. 87. — P. 327–340.

16. Ribeiro, R. A. Predicting weld bead geometry in the novel CW-GMAW process / R. A. Ribeiro, E. B. F. Santos, P. D. C. Assunção [et al.] // Welding Journal. — 2015. — Vol. 94, no. 9. — P. 301–311.

17. Ивочкин, И. И. Сварка под флюсом с дополнительной присадкой / И. И. Ивочкин, Б. Д. Малышев. — Москва : Стройиздат, 1981. — 176 с.

Сдана в редакцию 30.04.2020
Запланирована в номер 06.07.2020

Об авторах:

Мосин Алексей Александрович, заместитель директора по производству ЗАО «Курганстальмост» (640023, РФ, г. Курган, ул. Загородная, 3), ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5809-5423, Mosinaa@kurganstalmost.ru

Ерофеев Владимир Александрович, профессор кафедры «Сварка, литье и технология конструкционных материалов» ФГБОУ ВО «Тульский государственный университет» (300600, РФ, Тула, пр. Ленина, 92), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0003-3756-2640, Va_erofeev@mail.ru

Шолохов Михаил Александрович, заведующий кафедрой «Автоматизация и роботизация сварочного производства», ФГАОУ ВО «Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б. Н. Ельцина» (620002, РФ, г. Екатеринбург, ул. Мира, 19), кандидат технических наук, ORCID: https://orcid.org/0000-0002-7666-5645, M.a.sholokhov@urfu.ru

Заявленный вклад соавторов

А. А. Мосин — постановка цели и задач исследования, определение области моделирования и граничных условий, анализ результатов, подготовка текста, формирование выводов. В. А. Ерофеев — построение физико-математической модели, анализ результатов. М. А. Шолохов — научное руководство, доработка текста, корректировка выводов.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.